

**DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIONES MICELARES CRÍTICAS DE
SURFACTANTES UTILIZADOS EN FLOTACIÓN**

MÓNICA ANDREA CASTAÑEDA RODAS

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2011

**DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIONES MICELARES CRÍTICAS DE
SURFACTANTES UTILIZADOS EN FLOTACIÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Químico**

Por:

MÓNICA ANDREA CASTAÑEDA RODAS

**Director: Juan Manuel Barraza, Ing. Qco, M.Sc.,Ph.D.
Escuela de Ingeniería Química
Universidad del Valle**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2011

El trabajo de grado titulado “**Determinación de concentraciones micelares críticas de surfactantes utilizados en flotación**” y elaborado por la estudiante Mónica Andrea Castañeda Rodas es presentado a la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Químico.

Hemos revisado este trabajo de grado y recomendado su aprobación,

Juan Manuel Barraza, Ph.D.

Director de trabajo de grado

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, Diciembre 2011

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a todas las personas que de una u otra forma aportaron algo de su experiencia e hicieron posible la realización de esta investigación con su apoyo incondicional.

A mis padres.

Al profesor Juan Manuel Barraza, Ph.D, mi director de trabajo de grado, por darme la oportunidad de participar en este proyecto.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle.

Al profesor Jorge Luis Piñeres, Ph.D, por su inducción del equipo *Surfacetensiometer 20*.

Al profesor Gustavo Bolaños, Ph. D.

Al personal del Laboratorio de Combustión y Combustible.

A los integrantes del Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón.

A Gloria Lasso del Laboratorio de Ingeniería Química por su gran colaboración.

A mis amigos y compañeros de pregrado.

“La vida se pasa en un abrir y cerrar de ojos”, es una de las frases de mi mamá. A mí, me cuesta creer que ya haya culminado esta etapa, pero me queda un hermoso recuerdo de lo plenamente que la viví, me queda también un hermoso recuerdo del lugar donde conocí y cultivé a mis amigos.

A veces pienso que en la vida no hay casualidades, que existe un destino, y si no es así, se ha juntado tantas casualidades en mi vida que me han hecho estar en el tiempo-espacio correcto para correr con la fortuna de tener a la familia y amigos que tengo.

A mi mamá, a mi papá,
a mis abuelitas.
A Nicholas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. <i>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</i>	12
1.1 TENSIÓN SUPERFICIAL	12
1.2 GENERALIDADES DE LOS ESPUMANTES	13
1.3 CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA (CMC)	15
1.4 TERMODINÁMICA DE SUPERFICIE	17
2. <i>PARTE EXPERIMENTAL</i>	19
2.1 EQUIPOS	19
2.2 MATERIALES	21
2.2.1 Espumantes	21
2.2.2 Agua destilada	21
2.2.3 Cloruro de sodio (NaCl)	22
2.2.4 Solventes de limpieza	22
2.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN	22
2.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES	22
3. <i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	24
3.1 PRUEBAS SIN PRESENCIA DE NaCl PARA SURFACTANTES PUROS	24

3.2 PRUEBAS SIN PRESENCIA DE NaCl PARA MEZCLAS DE SURFACTANTES	26
3.3 PRUEBAS EN PRESENCIA DE NaCl (1M) PARA SURFACTANTES PUROS	28
3.4 PRUEBAS EN PRESENCIA DE NaCl(1M) PARA MEZCLAS DE SURFACTANTES	30
3.5 CÁLCULOS DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS	33
4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXO	43

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1 Propiedades del MIBC y del AF65	14
Tabla 1.2 CMC de surfactantes con o sin adición de sales neutras	16
Tabla 3.1 Comparación entre datos teóricos y experimentales para el MIBC	25
Tabla 3.2 Resultados para las mezclas sin presencia de NaCl	34
Tabla 3.3 Resultados para las mezclas en presencia de NaCl	36
Tabla A1 Promedio pruebas 100% MIBC sin NaCl	43
Tabla A2 Promedio pruebas 100% AF65 sin NaCl	43
Tabla A3 Promedio pruebas 20% AF65 80% MIBC, sin NaCl	44
Tabla A4 Promedio pruebas 50% AF65 50% MIBC, sin NaCl	44
Tabla A5 Promedio pruebas 80% AF65 20% MIBC, sin NaCl	45
Tabla A6 Promedio pruebas 100% MIBC en presencia de NaCl (1M)	45
Tabla A7 Promedio pruebas 100% AF65 en presencia de NaCl (1M)	46
Tabla A8 Promedio pruebas 20% AF65 80% MIBC, en presencia de NaCl (1M)	46
Tabla A9 Promedio pruebas 50% AF65 50% MIBC, en presencia de NaCl (1M)	47
Tabla A10 Promedio pruebas 80% AF65 20% MIBC, en presencia de NaCl (1M)	47

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Diagrama método del anillo	12
Figura 1.2 Acción de un surfactante sobre la tensión superficial	15
Figura 1.3 Tensión superficial vs. concentración del n-pentanol, MIBC, n-octanol y PPG-400	17
Figura 2.1 Fotografía del equipo <i>Tensiometer 20</i>	19
Figura 2.2 Imagen del anillo	21
Figura 3.1 Tensión superficial vs. Concentración de surfactantes puros sin NaCl	24
Figura 3.2 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para el AF65 y el MIBC sin NaCl	25
Figura 3.3 Tensión superficial vs. Concentración de mezclas de surfactantes sin NaCl	26
Figura 3.4 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para las mezclas de surfactantes sin NaCl	28
Figura 3.5 Tensión superficial vs. Concentración de surfactantes puros en presencia de NaCl (1M)	28
Figura 3.6 Tensión superficial vs. Concentración del AF65 puro, en presencia de NaCl (1M)	29
Figura 3.7 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para el MIBC puro en presencia	

deNaCl (1M)	30
Figura 3.8 Tensión superficial vs. Concentración de mezclas de surfactantes en presencia de NaCl (1M)	31
Figura 3.9 Tensión superficial vs. Concentración de las mezclas AF65 50% MIBC 50% y AF65 80% MIBC 20%, en presencia de NaCl (1M)	32
Figura 3.10 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para AF65 20% MIBC 80%, en presencia de NaCl (1M)	32
Figura 3.11 Tensión superficial vs. Concentración de polipropilenglicoles	34

RESUMEN

La flotación espumante es uno de los procesos de preparación por el que pasa el carbón antes de comercializarse, en él partículas finas de carbón se separan aprovechando la diferencia de propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas existentes entre la materia mineral y la materia orgánica. Uno de los reactivos químicos necesarios en la flotación son los espumantes y al incrementarse la concentración del espumante, la tensión superficial de la interface gas-líquido disminuye favoreciéndose la formación de espuma. Si la concentración sigue aumentándose se llegará a la Concentración Micelar Crítica (CMC), en donde la tensión superficial no disminuirá más y las moléculas del espumante se asociarán para formar micelas.

En este trabajo se realizó una investigación fundamental, en términos de determinar la CMC de los surfactantes Aerofroth 65 (AF65) y Metilsobutil Carbinol (MIBC), usados en procesos de flotación de carbones, a través del método de la tensiometría usando el equipo *Tensiometer 20*. Se hallaron 5 CMC de soluciones con diferentes porcentajes de surfactantes sin NaCl, así como 5 CMC en presencia de NaCl (1M).

Se observó que en el rango de concentraciones usadas, el AF65 puro presentó menores tensiones superficiales que el MIBC puro. Además, se encontró que las CMC de todas las soluciones trabajadas son menores en presencia de NaCl que en ausencia de ella. La mezcla de surfactantes para la cual la tensión superficial se mantuvo relativamente baja para todas las concentraciones por debajo de la CMC, fue la mezcla AF65 50% MIBC 50%, haciendo de esta configuración la del mejor resultado para las soluciones con y sin cloruro de sodio.

INTRODUCCIÓN

El carbón desde que se extrae y antes de comercializarse, pasa por una serie de etapas tales como transporte y preparación. Uno de los procesos de preparación lo representa el proceso de flotación espumante, en el que partículas finas de carbón se separan aprovechando la diferencia de propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas existentes entre la materia mineral y la materia orgánica.

La flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está representada por la materia mineral y la materia orgánica a separar, la fase líquida por el agua y la fase gas por el aire. Los sólidos finos y el agua, antes de la aplicación del proceso, se preparan en forma de pulpa. Una vez se ingresa la pulpa al proceso, se inyecta aire para formar las burbujas, que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas. Los sólidos deben tener un tamaño adecuado, lo cual se logra en procesos previos de trituración y molienda, pues al aumentar el tamaño de la partícula, las posibilidades de mala adherencia a la burbuja crecen; mientras que las partículas muy finas tienen alta probabilidad de producir un encuentro efectivo partícula-burbuja.

Para llevar a cabo la flotación es necesario usar reactivos químicos, los cuales juegan un papel importante en este proceso, pues al alimentarse en el circuito de flotación cumplen determinadas funciones específicas tales como hacer las partículas minerales más hidrofóbicas o producir espumas estables que hacen posible la separación de los minerales valiosos presentes en la ganga.

Los reactivos se dividen en colectores, espumantes y modificadores. Los colectores se adsorben en la superficie del mineral, confiriéndole características de repelencia al agua (hidrofobicidad). Los modificadores, tales como activadores, depresores o modificadores de pH, se usan para intensificar o reducir la acción de

los colectores sobre la superficie del mineral, mientras que los espumantes estabilizan la espuma, disminuyen la tensión superficial del agua, mejoran la cinética de interacción burbuja-partícula y reducen el fenómeno de unión de dos o más burbujas llamado coalescencia (Dudenrov et al, 1980).

La formación de espuma en un líquido está acompañada por un tremendo aumento del área de la interface líquido-gas, por lo tanto la formación de espuma se favorece por la presencia en el líquido de cualquier sustancia que disminuya su tensión superficial y de esta manera disminuya el trabajo necesario para aumentar la interface burbuja agua. Se ha encontrado (Adamson y Gast, 1997), que al incrementarse la concentración del espumante, la tensión superficial de la interface gas-líquido disminuye, evitándose la coalescencia de burbujas y disminuyéndose el tamaño de las mismas.

Si la concentración se aumenta, habrá un punto en donde la tensión superficial no disminuirá más y las moléculas del espumante se asociarán para formar micelas. La concentración del espumante en este punto se denomina Concentración Micelar Crítica (CMC), en donde se produce un cambio drástico en las propiedades físicas y químicas de las soluciones que contienen surfactantes (espumantes).

Por lo anterior, es necesario que las aplicaciones prácticas donde se utilicen surfactantes se basen en un conocimiento de la CMC, para así aprovechar al máximo las propiedades del espumante además de conocer su concentración límite. Es importante apuntar que actualmente las concentraciones de los espumantes empleados en la realización de pruebas de flotación del Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón de la Universidad del Valle para beneficiar carbones, se determinan por ensayos de prueba y error. El presente trabajo está encaminado a realizar una investigación fundamental, en términos de determinar la CMC de surfactantes usados en procesos de flotación de carbones, a través del método de la tensiometría.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Tensión SUPERFICIAL

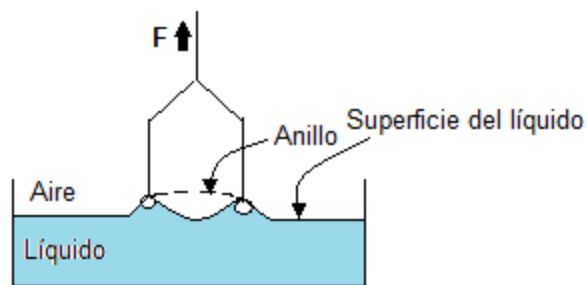
La tensión superficial se define como la fuerza por unidad de longitud ejercida perpendicularmente a una línea cualquiera contenida en la interface que separa a dos fluidos inmiscibles. Dicha fuerza es tangencial a la superficie del líquido (Burbano et al., 2005).

Un método para determinar la tensión superficial es el método del anillo (Figura 1.1), en el que un anillo de platino se coloca sobre la superficie del líquido y se mide la fuerza requerida para separar el anillo de la superficie. En este método la fuerza de separación es igual a la tensión superficial por el perímetro de líquido separado:

$$F = 2\pi(R_1 + R_2)\gamma$$

Donde F es la fuerza de separación y R_1 y R_2 los radios interior y exterior del anillo respectivamente. También debe asegurarse que el líquido y el anillo forman un ángulo de contacto igual a cero, o la ecuación no tendrá validez. Además, el anillo debe quedar horizontal en la superficie (Aulton, 2004).

Figura 1.1 Diagrama método del anillo



Debido a que el líquido soportado por el anillo durante la separación adopta una forma compleja y, por consiguiente, la tensión superficial no actúa verticalmente, la ecuación simple anterior es errónea y deben introducirse factores de corrección para conseguir mediciones exactas (Aulton, 2004).

Para hallar las CMC de las mezclas de surfactantes, se utilizó el equipo *Surfactometer 20*, el cual aplica la teoría del método del anillo. Dicho equipo trae en su manual explícitamente el factor de corrección que se debe aplicar.

1.2 GENERALIDADES DE LOS ESPUMANTES

Los espumantes son generalmente reactivos orgánicos de superficie activa heteropolar, capaces de adsorberse en la interface aire-agua. Cuando las moléculas de superficie activa reaccionan con el agua, los dipolos del agua se combinan rápidamente con los grupos polares hidratándolos, pero prácticamente no hay reacción con el grupo de hidrocarburo no-polar. La tendencia es forzar el hidrocarburo no-polar hacia el interior de la fase aire. De este modo la estructura heteropolar de la molécula espumante causa su adsorción (Bulatovic, 2007).

Los espumantes deben ser relativamente solubles en agua, de otra manera se distribuyen muy irregularmente en una solución acuosa y sus propiedades de activador de superficie no resultan completamente efectivas (Willis, 1994).

Existen diferentes tipos de clasificación de espumantes según sus propiedades y comportamiento en soluciones. Dudenkov et al (1980), clasificaron los espumantes como ácidos, neutros y básicos, dependiendo de su comportamiento a diferentes valores de pH.

Los espumantes ácidos se usaron ampliamente hasta los años 60. Su aplicación ha disminuido debido a consideraciones ambientales. Estos espumantes solo se usan con pH ácidos, puesto que en medio alcalino sus propiedades son reducidas. Los

espumantes básicos se emplean en flotaciones de minerales metálicos, mientras que los espumantes neutros son el grupo más importante y más usado en procesos de flotación de minerales, debido a que pueden funcionar tanto en medios ácidos como en medios alcalinos.

En la actualidad se utilizan muchos espumantes sintéticos, los cuales son alcoholes de alto peso molecular. Estos alcoholes se prefieren en comparación con los espumantes industriales tales como el aceite de pino y el cresol, puesto que sus compuestos son más estables facilitando el control del proceso de flotación y mejoramiento del rendimiento. El Metilsobutil Carbinol (MIBC) y el Aerofroth 65 (AF65) son ejemplos de espumantes sintéticos (Erdoğan, 2005).

Dependiendo de la naturaleza del grupo hidrofílico, los surfactantes se clasifican como aniónicos (portan una carga negativa), catiónicos (portan una carga positiva), zwitteriónicos (portan carga negativa y positiva) y no iónicos (no portan ningún tipo de carga).

Por otro lado, el incremento en la longitud del grupo hidrofóbico, decrece la solubilidad del surfactante en agua e incrementa la solubilidad en solventes orgánicos, aumentando la tendencia del surfactante a adsorberse en una interface o a formar micelas (Erdoğan, 2005).

Tabla 1.1 Propiedades del MIBC y del AF65

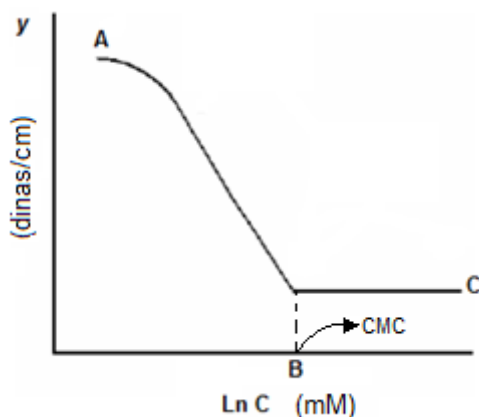
	MIBC	AF65
Fórmula molecular	$[(CH_3)_2CHCH_2CH(OH)CH_3]$	$[OH(C_3H_6O)_{6.5}H]$
Densidad (g/mL)	0.80	0.92
Peso molecular (g/mol)	102.2	395
pH	Neutro	Neutro
Clasificación espumante	No iónico	No iónico

Debido a que los espumantes que se utilizaron en este estudio fueron el MIBC y el AF65, es necesario especificar algunas de sus propiedades como sus fórmulas moleculares (Harris y Jia, 1999) y sus densidades (determinadas experimentalmente); tales como las mostradas en la tabla 1.1.

1.3 CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA (CMC)

La CMC es un fenómeno que presentan los surfactantes debido a la estructura polar-apolar de sus moléculas. Los surfactantes decrecen la tensión superficial del líquido en las concentraciones por debajo de la crítica, en donde el surfactante ha cubierto la totalidad de la superficie. Por encima de esta concentración las moléculas del surfactante se dirigen hacia el interior del líquido formando micelas y como consecuencia se produce una estructura de alto peso molecular (Tanet al., 2010).

Figura 1.2 Acción de un surfactante sobre la tensión superficial



La Figura 1.2 muestra el efecto de la concentración de un surfactante sobre la tensión superficial. Se observa que al aumentar la concentración de surfactante en el agua, la tensión superficial disminuye (línea AB) debido a que las moléculas se adsorben en la superficie del agua. Al agregar mayor cantidad de surfactante se alcanza el punto B donde las moléculas están totalmente empaquetadas en la superficie, de forma vertical, con la parte hidrofílica orientada hacia el agua y la parte hidrofóbica hacia el aire. Si se continúa agregando surfactante, no caben más

moléculas en la superficie, y se agregan en micelas. A partir de este punto la tensión superficial no decrece más y permanece aproximadamente constante (línea horizontal BC). La concentración a la que comienza la formación de micelas (punto B) es la CMC.

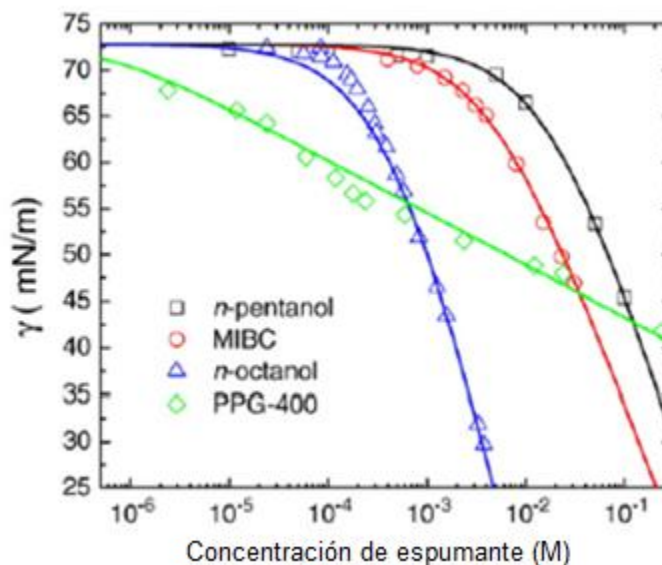
Además, es importante señalar que la adición de una sal neutra, tal como el NaCl, KBr o NaBr, causa una disminución de la tensión superficial en la curva tensión superficial-concentración, provocando una CMC menor en comparación cuando no hay presencia de sal. La tabla 1.2 muestra las CMC de algunos surfactantes a diferentes concentraciones de sales neutras (Rao, 2004).

Tabla 1.2 CMC de surfactantes con o sin adición de sales neutras

Surfactante	Solución	CMC (Mol/litro)
$C_{12}H_{25}SO_4Na$	Agua	8.2
	0.01 M NaCl	5.6
	0.10 M NaCl	1.5
$C_{12}H_{25}N(CH_3)_3Br$	Agua	14.5
	0.001 M KBr	12.0
	0.100 M NaBr	4.5
	0.500 M NaBr	2.0
$C_{12}H_{25}NH_2 \cdot HCl$	Agua	14.8
	0.01 N NaCl	11.3
	0.02 N NaCl	8.9

A pesar de la búsqueda bibliográfica que se realizó para encontrar las CMC de los surfactantes escogidos y de sus mezclas no se halló ningún dato. Sin embargo, la Figura 1.3 representa el comportamiento de tensión superficial vs. Concentración de los surfactantes n-pentanol, MIBC, n-octanol y Polipropilenglicol 400 (PPG-400). Estas gráficas representan la ecuación de Szyszkowski (Wang y Yoon, 2007).

Figura 1.3 Tensión superficial vs. concentración del n-pentanol, MIBC, n-octanol y PPG-400



1.4 TERMODINÁMICA DE SUPERFICIE

Los líquidos tienden a minimizar su área superficial debido a que se requiere energía para crear una superficie, es por esto que forman gotas esféricas. Por otro lado, en el seno de un líquido las moléculas están rodeadas por todos los lados de interacciones favorables con las moléculas vecinas, lo cual permite que tengan una energía bastante baja, mientras que en la superficie, las moléculas experimentan pocas interacciones con otras moléculas. Por lo tanto, la cantidad de energía requerida para crear una superficie por unidad de área se denomina energía libre superficial y se expresa como:

$$dG = \gamma dA \quad (T, P, n \text{ constantes})$$

La energía libre superficial (γ) es igual a la tensión superficial para un líquido. Los líquidos con interacciones moleculares fuertes tienen grandes tensiones superficiales, y se les dificulta mojar otras superficies (http://chemweb.calpoly.edu/jhagen/CMC_Surface_Tens.pdf).

Como se mencionó anteriormente, la concentración de un surfactante en la superficie es más grande que la concentración del surfactante en el seno del fluido. El exceso de concentración del surfactante en la superficie se denomina superficie de exceso (Γ). La ecuación que relaciona la superficie de exceso, con la concentración de surfactante y la tensión superficial es dada por Gibbs (Isoterma de Adsorción de Gibbs):

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \ln C}\right)_T = -RT\Gamma$$

Si se asume que la energía de adsorción del surfactante es constante, se tiene la siguiente relación dada por Langmuir (Isoterma de Adsorción de Langmuir):

$$\omega\Gamma = \frac{K_{ad}C}{1 + K_{ad}}$$

Donde ω es el área transversal de las moléculas de surfactante en la superficie (por mol) y K_{ad} es la constante de equilibrio de adsorción. Si se resuelve la anterior ecuación para la superficie de exceso, y se sustituye esta expresión en la ecuación de Gibbs y se integra, se obtiene la ecuación de Szyszkowski:

$$\gamma = \gamma_0 - \frac{RT}{\omega} \ln(1 + K_{ad}C)$$

Finalmente se puede calcular la energía libre de adsorción estándar (referida a 1M estado estándar) a partir de esta constante de equilibrio:

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln K_{ad}$$

Como la concentración del surfactante sigue aumentando, un segundo equilibrio, distinto al de la superficie de adsorción sucede cuando se llega a la CMC. Se puede calcular entonces la energía libre de formación micelar estándar usando la CMC (http://chemweb.calpoly.edu/jhagen/CMC_Surface_Tens.pdf):

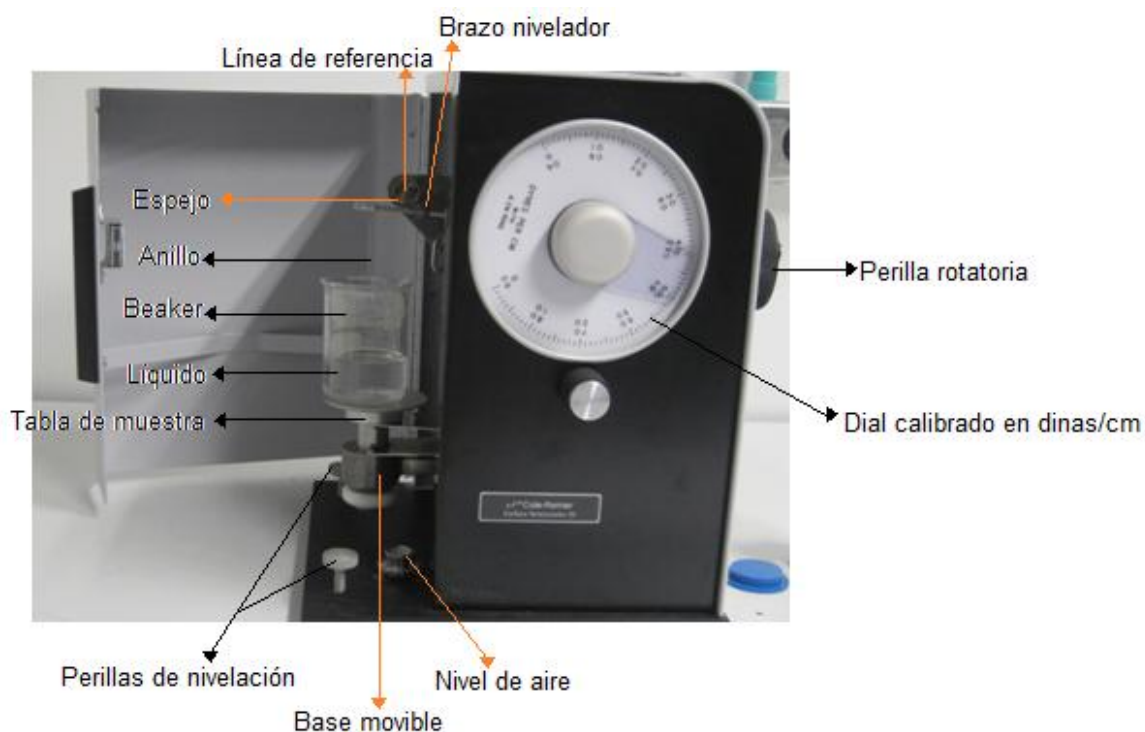
$$\Delta G_{mic}^\circ = RT \ln CMC$$

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 EQUIPOS

En esta investigación se utilizó un tensiómetro *tensiometer 20*, el cual se muestra en la Figura 2.1. Este es un equipo que no había sido utilizado anteriormente y por lo tanto, antes de realizar las pruebas fue necesario adecuarlo, calibrarlo y efectuar pruebas de ensayo.

Figura 2.1 Fotografía del equipo *Tensiometer 20*



Dicho equipo se usó para determinar la tensión superficial y la tensión interfacial aparente de los líquidos utilizando los principios de operación de Pierre Lecomte du Nouy (manual del equipo). En el método du Nouy, la tensión superficial aparente se

determina midiendo la fuerza que se requiere para desprender un anillo horizontal de alambre de platino-iridio de la superficie de un líquido (Levitt, 1979).

El “verdadero” valor de la tensión superficial se determina usando un factor de corrección dado en el manual del equipo, representado por la ecuación 2.1:

$$F = 0.7250 + \sqrt{\frac{0.01452P}{C^2D} + 0.04534} - \frac{1.679r}{R} \quad (2.1)$$

Donde:

F = Factor de corrección

R = Radio del anillo (0.955 cm)

r = Radio del alambre del anillo (0.007 in)

P = Valor aparente leído

D = Densidad del líquido (1 g/cm³)

C = circunferencia del anillo (6 cm)

Es importante aclarar que para hacer uso de la anterior ecuación, todas las variables deben expresarse en el sistema centímetro-gramo-segundo, con densidades expresadas en g/cm³, P en dinas/cm; R, r y C en cm.

El equipo se calibró y ajustó según las instrucciones del manual; las pruebas de ensayo se realizaron con agua basándose en la tensión superficial reportada por Atkins y Jones (2006), la cual fue de 72.8 mN/m a 20°C.

Para las mediciones de la tensión superficial se usó un anillo suministrado por la compañía Cole-Parmer® (Figura 2.2), de aleaciones iridio-platino y con dimensiones conocidas. El anillo se trató con sumo cuidado para evitar deformaciones que pudiesen afectar la lectura de la tensión superficial aparente. Esto hizo del trabajo un poco extenuante dado que el anillo, con un radio de alambre de tan solo 0.007 in (0.18 mm), era demasiado frágil.

Figura 2.2 Imagen del anillo



2.2 MATERIALES

2.2.1 Espumantes. Se utilizaron los espumantes Metilsobutil Carbinol (MIBC), de tipo alcohol alifático y el Aerofroth 65 (AF65) de tipo polipropilenglicol éter. El MIBC fue suministrado por WakoPureChemical Industries, Ltd. y el AF65 por Cytec Industries, Inc. Estos espumantes se escogieron como reactivos para este trabajo de investigación porque han sido los más utilizados en las investigaciones relacionadas con el proceso de flotación de carbón, realizadas por el grupo de Ciencia y Tecnología de Carbón de la Universidad del Valle.

Para formar las disoluciones de espumantes y de sus mezclas, fue necesario hacer uso de microjeringas. A cada espumante se le asignó una microjeringa con el fin de evitar contaminación por manipulación. Al principio y al final de cada prueba las jeringas se lavaron con agua destilada.

2.2.2 Agua destilada. Para el desarrollo de las pruebas se usó agua destilada proveniente del laboratorio de combustibles de la Universidad del Valle. Se aclara que sólo fue necesario hacer el llenado de una garrafa de 8 litros para realizar todas las corridas, de esta manera se aseguró la misma calidad de agua en todas las pruebas.

2.2.3 Cloruro de sodio (NaCl). Todas las pruebas con sal se realizaron a una concentración fija de 1 M. El NaCl fue de tipo comercial de marca Prodesal.

2.2.4 Solventes de limpieza. Los solventes de limpieza usados fueron tolueno y acetona. La limpieza del anillo y de los beakers jugó un papel fundamental, ya que cualquier impureza restante en alguno de los materiales repercute en la lectura de la tensión superficial aparente. Fue necesario, antes y después de cada prueba, sumergir el anillo en tolueno (para remover los hidrocarburos), luego en acetona (para remover el tolueno) y finalmente dejar que la acetona se evaporara. El mismo procedimiento de limpieza se aplicó con los beakers.

2.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para el trabajo experimental de esta investigación fue necesario asegurar una temperatura constante pues la tensión superficial de los líquidos varía con la temperatura. Por lo cual, se trabajó en un cuarto con aire acondicionado a una temperatura constante de 20°C.

2.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este trabajo se hallaron 5 CMC de soluciones con diferentes porcentajes de surfactantes sin NaCl, así como 5 CMC en presencia de NaCl (1M). Los porcentajes usados en cada solución fueron los siguientes:

- 100% MIBC
- 100% AF65
- 80% MIBC, 20% AF65
- 50% MIBC, 50% AF65
- 20% MIBC, 80% AF65

Se realizaron pruebas variando la concentración de espumante para obtener la CMC respectiva. Se hicieron al menos dos pruebas para cada solución y luego se sacó un promedio. Inicialmente se obtuvieron las CMC sin usar cloruro de sodio. Se realizaron 5 pruebas para las configuraciones 100% MIBC y 100% AF65, 7 pruebas para 80% MIBC 20% AF65, 3 pruebas para 50% MIBC 50% AF65 y 2 pruebas para la configuración 20% MIBC 80% AF65. Todas las pruebas con NaCl tuvieron un solo duplicado.

Para las configuraciones a las que se les hicieron más de dos corridas, se escogieron los dos resultados que mostraban mejor repetitividad y a estos se les sacó el promedio de la tensión superficial (Véase Anexo).

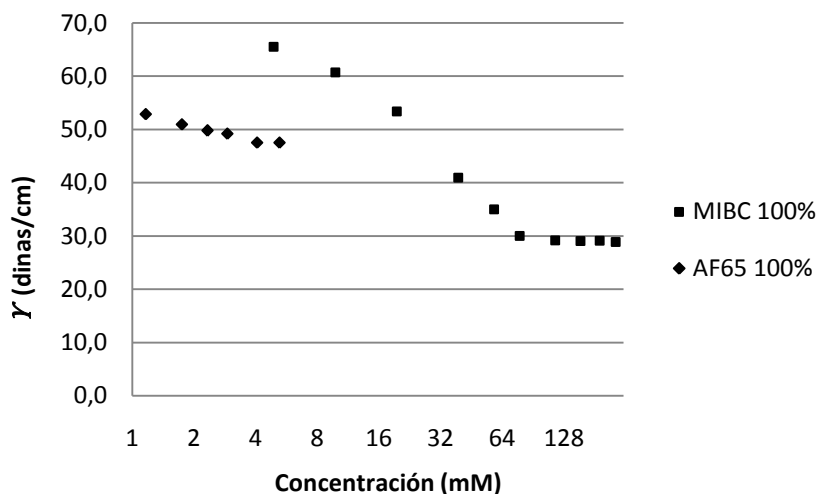
Es importante señalar que cada lectura de tensión superficial aparente a una determinada concentración se tomó hasta 3 veces y luego se hizo un promedio de ella, posteriormente se obtuvo el valor de la tensión superficial usando el factor de corrección dado por el manual del equipo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 PRUEBAS SIN PRESENCIA DE NaCl PARA SURFACTANTES PUROS

La Figura 3.1 representa el comportamiento de la tensión superficial con respecto a la concentración de los dos surfactantes puros en ausencia de NaCl. Esta figura se basa en los datos obtenidos y reportados en el Anexo.

Figura 3.1 Tensión superficial vs. Concentración de surfactantes puros sin NaCl



Resulta interesante observar que a bajas concentraciones el AF65 disminuye más la tensión superficial de la solución que el MIBC, además, logra el punto micelar (tensión superficial constante con un valor aproximado de 48 dinas/cm) con una tensión superficial mayor que la del MIBC (alrededor de 29 dinas/cm). De la gráfica también se puede deducir que la CMC del AF65 es menor que la CMC del MIBC alcanzando ésta última una menor tensión superficial (29 dinas/cm).

Con el fin de corroborar los datos experimentales obtenidos en este trabajo para el MIBC puro (sin NaCl), se realizó una comparación con datos teóricos obtenidos por

Wang y Yoon (2007), (Figura 1.3). La tabla 3.1 muestra la diferencia entre estos resultados.

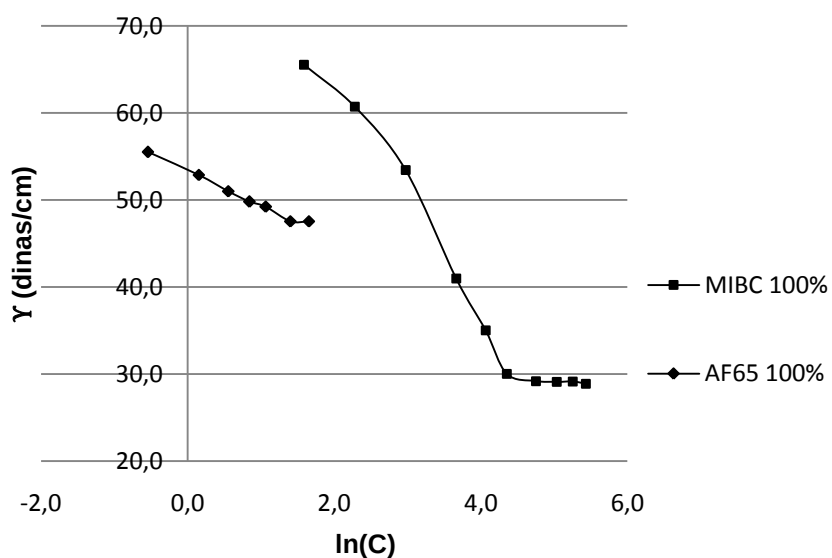
Tabla 3.1 Comparación entre datos teóricos y experimentales para el MIBC

γ (dinas/cm)	C teórica, (M)	C experimental, (M)	% Error (base teórica)
65.5	0.0040	0.0049	15.00
60.7	0.0095	0.0098	3.16
53.4	0.0170	0.0185	8.82
41.0	0.0400	0.0389	2.75
35.0	0.0700	0.0951	35.86

Tal como se observa en la tabla 3.1, el mayor porcentaje de error fue de 35.86% que se puede atribuir a errores de manipulación, contaminación de la solución y del anillo y cambios de temperatura.

Las concentraciones micelares críticas de estas dos configuraciones se determinaron al graficar la tensión superficial en función del $\ln(C)$ (ver Figura 3.2).

Figura 3.2 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para el AF65 y el MIBC sin NaCl.

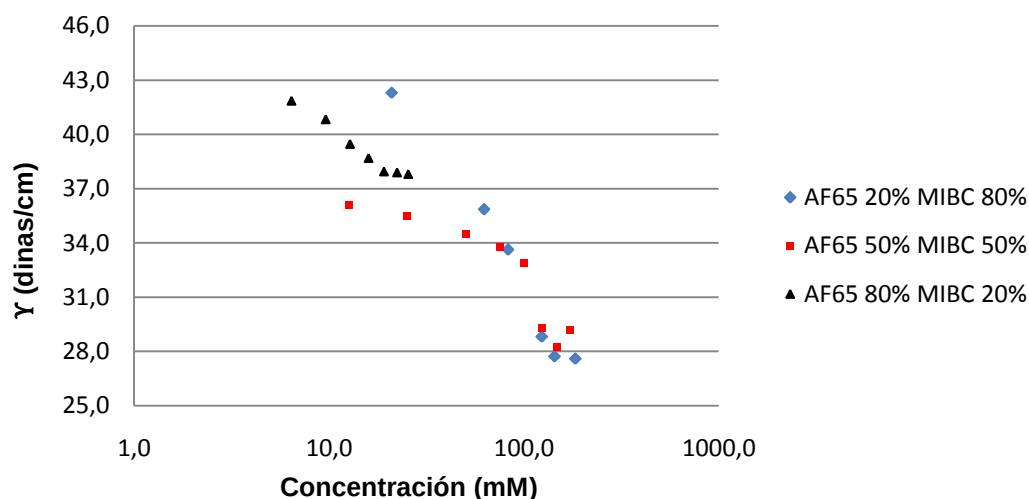


La concentración micelar crítica se encuentra en la intersección de las dos líneas de diferentes pendientes mostradas en la Figura 3.2. A cada línea (una donde la tensión superficial está cambiando con la concentración y la otra donde es constante) se les realizó una regresión lineal con el fin de igualar el punto de corte y encontrar la concentración correspondiente a la tensión superficial. Las CMC del MIBC 100% y del AF65 100% encontradas fueron de 0.079 M y 0.0042 M respectivamente, las cuales produjeron una tensión superficial (en el punto de la CMC) de 29 dinas/cm y 48 dinas/cm respectivamente.

3.2 PRUEBAS SIN PRESENCIA DE NaCl PARA MEZCLAS DE SURFACTANTES

La Figura 3.3 muestra el comportamiento de la tensión superficial en función de la concentración de mezclas de surfactantes.

Figura 3.3 Tensión superficial vs. Concentración de mezclas de surfactantes sin NaCl



La Figura 3.3 muestra que la mezcla que presenta la menor tensión superficial (28 dinas/cm) es la mezcla AF65 20% MIBC 80%, esto es coherente con los resultados mostrados en la Figura 3.1 debido a que esta mezcla presenta una alta

concentración de MIBC, el cual en forma pura alcanza la menor tensión superficial (29 dinas/cm).

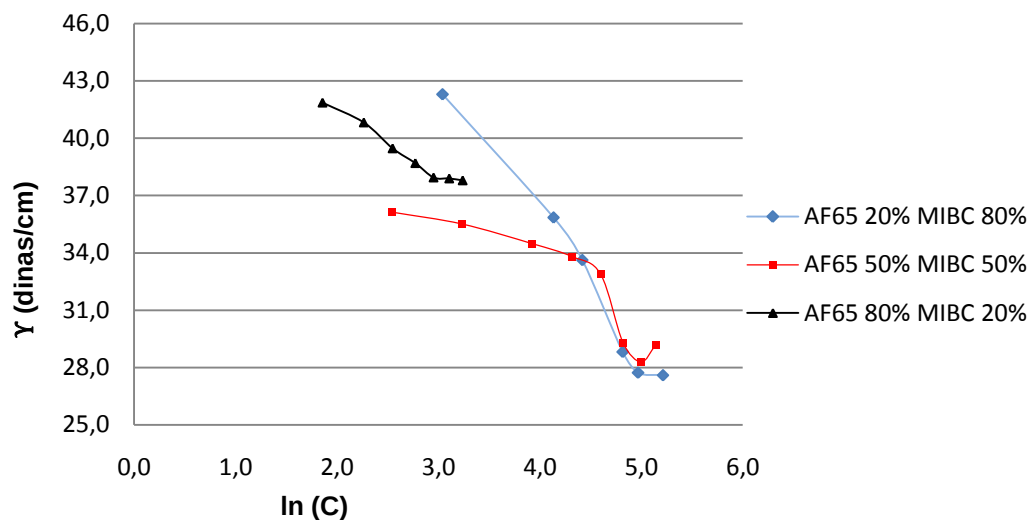
Al comparar la curva de la mezcla AF65 20% MIBC 80% con la curva de la mezcla AF65 80% MIBC 20% se obtiene el mismo comportamiento de la Figura 3.1. Las moles totales de la mezcla rica en MIBC, en principio, no reducen tanto la tensión superficial como sí lo hacen las moles totales de la mezcla rica en AF65. Se puede observar además, como en la Figura 3.1, que la más alta CMC corresponde a la mezcla rica en MIBC presentando la menor tensión superficial.

En cuanto a la curva perteneciente a la mezcla AF65 50% MIBC 50%, se puede inferir que se obtiene un comportamiento muy similar al de la mezcla AF65 20% MIBC 80% en concentraciones mayores a 100 mM y que su CMC está muy cercana a dicha configuración. Sin embargo, para concentraciones por debajo de 100 mM alcanza una tensión superficial menor que la de las otras mezclas, y su comportamiento se asemeja al de la mezcla AF65 80% MIBC 20%. Por lo tanto esta mezcla se presenta como la del mejor resultado pues al utilizar concentraciones bajas alcanza la menor tensión superficial y en concentraciones altas alcanza una tensión superficial similar a la de la mezcla AF65 20% MIBC 80% (reportada como la más baja en el punto micelar).

Para encontrar las CMC de las tres mezclas se realizó el mismo procedimiento descrito en la sección 3.1. La Figura 3.4 muestra la tensión superficial en función del $\ln(C)$.

Las CMC de las mezclas AF65 20% MIBC 80%, AF65 50% MIBC 50% y AF65 80% MIBC 20% encontradas fueron de 0.1423 M, 0.1382 M y 0.0190 M respectivamente, las cuales produjeron una tensión superficial (en el punto de la CMC) de 28 dinas/cm, 29 dinas/cm y 38 dinas/cm respectivamente.

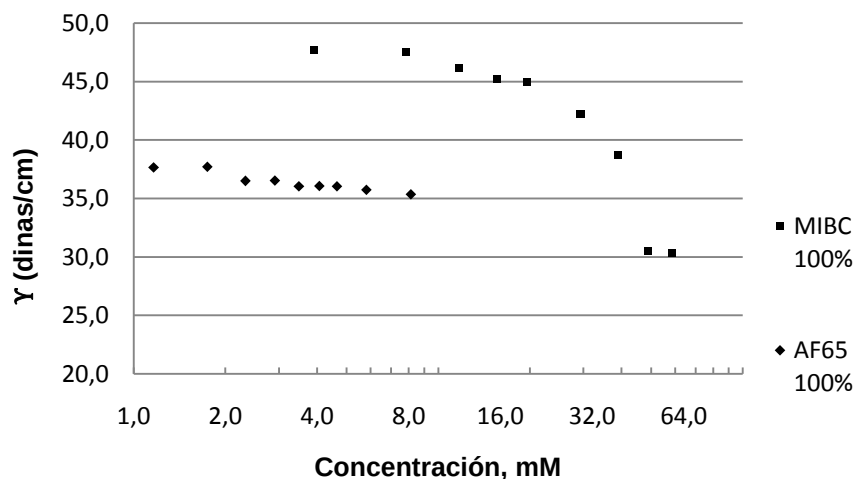
Figura 3.4 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para las mezclas de surfactantes sin NaCl.



3.3 PRUEBAS EN PRESENCIA DE NaCl (1M) PARA SURFACTANTES PUROS

El resultado obtenido de las pruebas realizadas para el AF65 y el MIBC en presencia de NaCl (1M) se representa en la Figura 3.5.

Figura 3.5 Tensión superficial vs. Concentración de surfactantes puros en presencia de NaCl (1M).

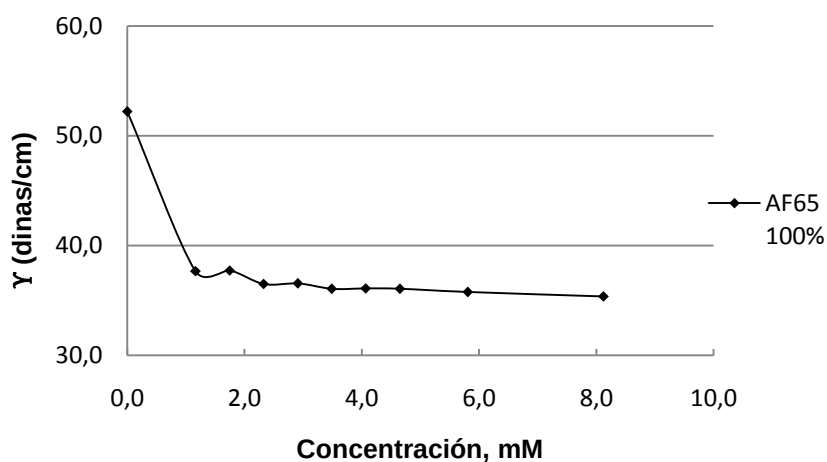


La curva del MIBC alcanza una tensión superficial de 30 dinas/cm, mientras el AF65 una de 35 dinas/cm, por lo tanto, a pesar de que en soluciones salinas la

menor tensión superficial que se obtiene usando como espumante el MIBC es casi igual que en ausencia de NaCl, al usar el AF65 no se presenta el mismo comportamiento, pues sin la presencia de la sal se obtiene una tensión superficial mayor (48 dinas/cm). Esto permite inducir que el uso del AF65 se ve favorecido en una solución salina.

Por otro lado, al comparar las Figuras 3.1 y 3.5 se observa que las CMC de las soluciones de surfactantes disminuyen en presencia de sal, lo cual es coherente con la sección 1.3 del presente trabajo. Además las tensiones superficiales para ambas soluciones a bajas concentraciones son menores que las de la Figura 3.1, lo cual implica que para bajas concentraciones de surfactante se favorece el uso de soluciones salinas.

Figura 3.6 Tensión superficial vs. Concentración del AF65 puro, en presencia de NaCl (1M)



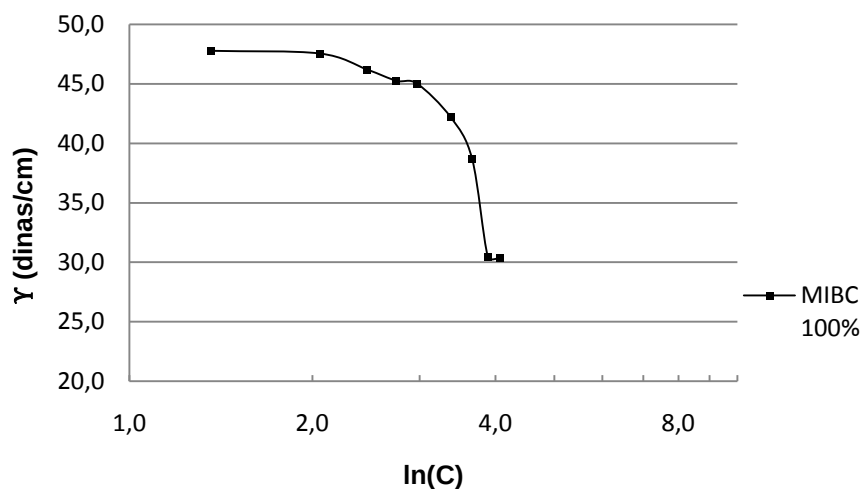
Para hallar la CMC del AF65 puro no fue necesario realizar la gráfica logarítmica debido a que las tensiones superficiales no se diferenciaban mucho unas de otras. Por lo tanto se trabajó con la Figura 3.6, en la cual se grafica el punto donde la concentración del surfactante es cero con una tensión superficial de 52 dinas/cm. Aunque la tensión superficial de soluciones similares de NaCl es mayor, el tipo de sal comercial empleada pudo contener muchos más iones, los cuales interactuaron en conjunto en la superficie para reducir la tensión superficial (Ozdemir et al.,

2009), por lo tanto se recomienda hacer un análisis químico de la sal en posteriores estudios.

En la Figura 3.6 se puede apreciar la intersección de dos líneas: una para el área donde la tensión superficial cambia con la concentración y otra donde es constante, en el punto de corte se obtiene la CMC del AF65 100% en presencia de NaCl con un valor de 0.0012 M y una tensión superficial en este punto de 35 dinas/cm.

Por el contrario, para el MIBC sí fue necesario realizar la gráfica logarítmica para hallar su CMC la cual fue de 0.0513 M y la tensión superficial en este punto de 30 dinas/cm (Ver Figura 3.7).

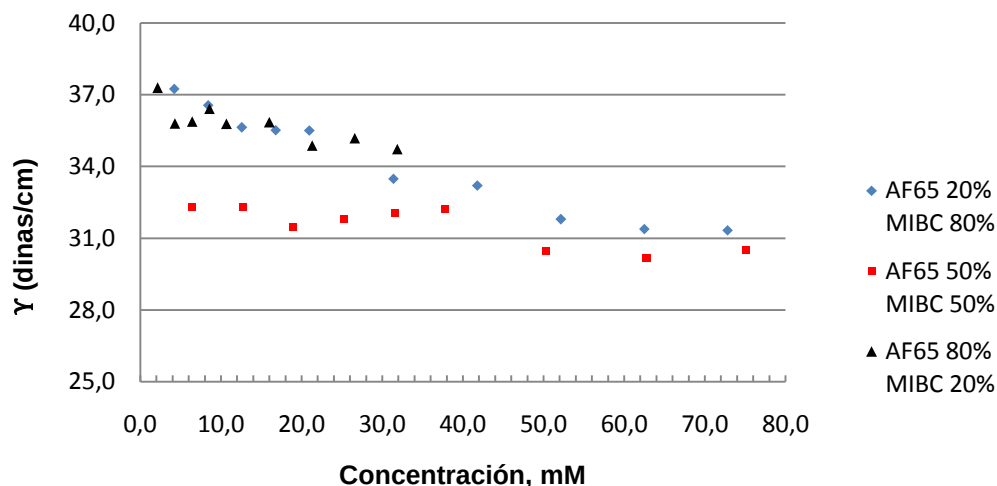
Figura 3.7 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para el MIBC puro en presencia de NaCl (1M).



3.4 PRUEBAS EN PRESENCIA DE NaCl (1M) PARA MEZCLAS DE SURFACTANTES

La Figura 3.8 representa los resultados obtenidos de tensión superficial en función de la concentración de surfactantes en presencia de NaCl (1M).

Figura 3.8 Tensión superficial vs. Concentración de mezclas de surfactantes en presencia de NaCl (1M)



Es interesante observar que para este caso las tres curvas están muy cercanas y a diferencia de la Figura 3.3, la tensión superficial de las tres mezclas no varía mucho con la concentración. También, la mezcla AF65 50% MIBC 50% es la que logra una menor tensión superficial (30.5 dinas/cm) en comparación con las otras mezclas: 31 dinas/cm para la mezcla AF65 20% MIBC 80% y 36 dinas/cm para la mezcla AF65 80% MIBC 20%, lo cual no sucede en la Figura 3.3.

Sin embargo, se sigue teniendo el mismo efecto que el de la Figura 3.3 donde para la mezcla rica en AF65 se obtiene la tensión superficial más alta en el punto micelar en comparación con las otras mezclas. Se concluye entonces que la sal hace que los comportamientos tensión superficial-concentración, en las diferentes mezclas de surfactantes no difieran mucho, aunque se siguen tendencias de los comportamientos de las mezclas sin sal, además se alcanzan las CMC a bajas concentraciones. Por otro lado, las tensiones superficiales antes del punto micelar son inferiores a las de las pruebas sin sal, lo cual permite llegar a la conclusión que las mezclas de los surfactantes son más eficaces en soluciones salinas, cuando se utilizan concentraciones por debajo de la micelar con el fin de lograr la menor tensión superficial posible.

Para hallar las CMC fue necesario realizar la intercepción de las dos líneas para cada mezcla como se ha hecho anteriormente. Para la única mezcla que fue necesario realizar la gráfica logarítmica fue para AF65 20% MIBC al 80% (Ver Figuras 3.9 y 3.10).

Figura 3.9 Tensión superficial vs. Concentración de las mezclas AF65 50% MIBC 50% y AF65 80% MIBC 20%, en presencia de NaCl (1M).

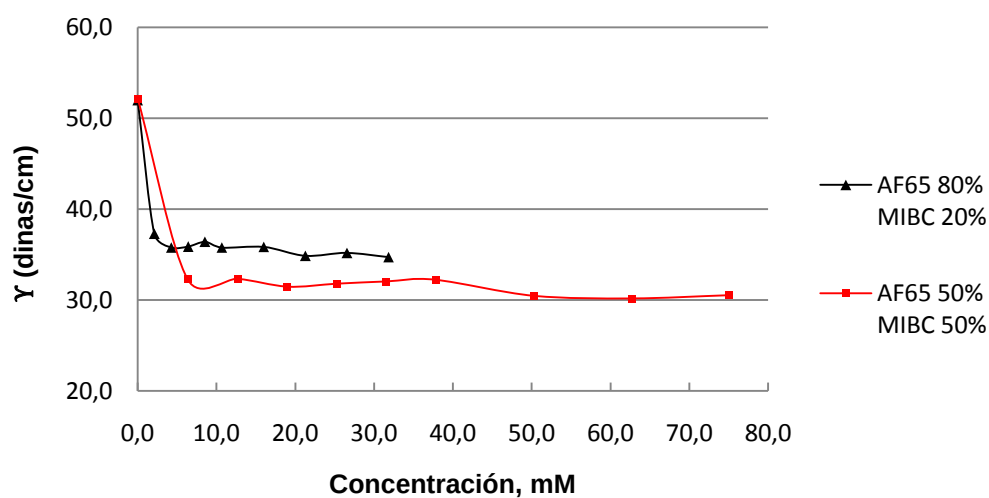
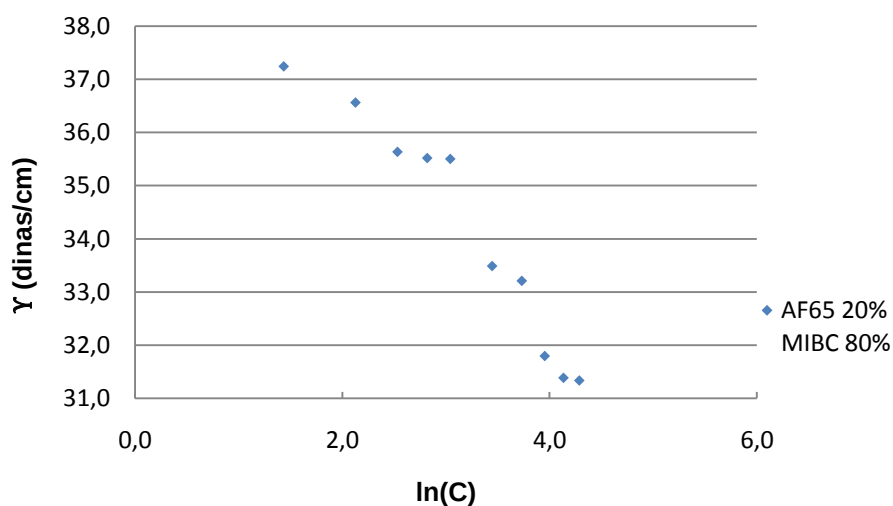


Figura 3.10 Tensión superficial vs. $\ln(C)$ para AF65 20% MIBC 80%, en presencia de NaCl (1M).



3.5 CÁLCULOS DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

Se realizaron algunos cálculos termodinámicos para encontrar la energía libre de adsorción estándar definida por la ecuación $\Delta G_{ad}^{\circ} = -RT \ln K_{ad}$ y la energía libre de formación micelar estándar dada por $\Delta G_{mic}^{\circ} = RT \ln CMC$.

Para hallar la energía libre de adsorción estándar fue necesario encontrar primero el valor de la constante de adsorción (K_{ad}), por lo cual se realizó una gráfica para cada mezcla de tensión superficial versus concentración haciendo uso de todos los datos por debajo de la CMC. Usando el programa Polymath Professional Version 6.1 se realizó un ajuste de estos datos en la ecuación de Szyszkowski:

$$\gamma = \gamma_0 - \frac{RT}{\omega} \ln(1 + K_{ad}C)$$

Se obtuvo entonces el valor de la constante de adsorción y de el área transversal de las moléculas de surfactante en la superficie por mol (ω) para cada mezcla con y sin cloruro de sodio, con una precisión en promedio de 0.99 ($R^2=0.99$).

Para las mezclas con cloruro de sodio: AF65 100%, AF65 50% MIBC 50% y AF65 80% MIBC 20% no fue posible hallar la (K_{ad}), ni el ω y por ende la energía libre de adsorción estándar, debido se contó con solo dos puntos o datos por debajo de la CMC.

Los cálculos fueron realizados trabajando las concentraciones en unidades de concentración molar (M) y con:

$$T = 293 \text{ K}$$

$$R = 8.3145 \frac{J}{mol.K}$$

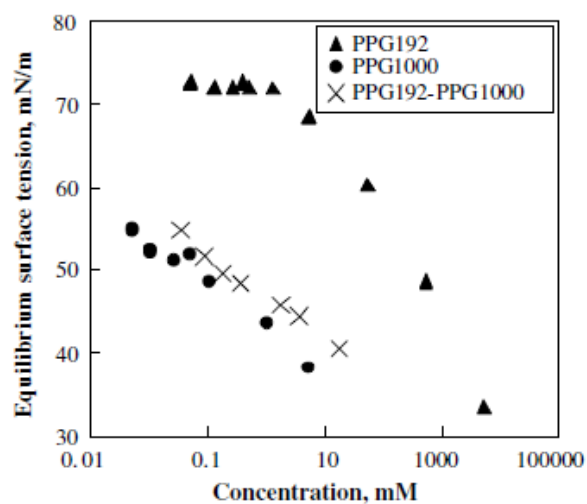
Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Resultados para las mezclas sin presencia de NaCl.

	CMC (M)	γ_{CMC} (Dinas/cm)	$\Delta^{\circ}_{\text{mic}}G$ (J/mol)	K_{ad} (litro/mol)	ω (m ² /mol)	$\Delta^{\circ}_{\text{ad}}G$ (J/mol)
AF65 100%	0.0042	48	-13303.4	1.01E+05	593.41	-28071.4
MIBC 100%	0.0779	29	-6217.9	61.97	98.55	-10053.1
AF65 20% MIBC 80%	0.1423	28	-4750.0	2772.03	332.88	-19312.2
AF65 50% MIBC 50%	0.1382	29	-4821.3	1.01E+05	541.91	-28071.4
AF65 80% MIBC 20%	0.0190	38	-9655.2	1.01E+05	529.57	-28071.4

Para propósitos comparativos, en la Figura 3.11 se muestran valores de tensión superficial en función de la concentración de varios polipropilenglicoles, valores obtenidos por Tan et al., 2004.

Figura 3.11 Tensión superficial vs. Concentración de polipropilenglicoles



Donde el PPG192 tiene un peso molecular de 192 y el PPG1000 de 990. PPG192-PPG1000 representa una mezcla de los 2 polipropilenglicoles. Como se observa, el rango de tensiones superficiales de la Figura 3.11 oscila entre 72 mN/m y 28 mN/m. Dado que la tensión superficial en la CMC obtenida para el AF65 es de

48 dinas/cm (48 mN/m) en este trabajo, existe un acuerdo con los valores reportado por Tan et al., 2004.

Los datos de la Tabla 3.2 muestran que la solución que presenta la mayor CMC la representa la mezcla AF65 20% MIBC 80%, caracterizándose además por tener la menor tensión superficial. Sin embargo, y como se discutió anteriormente en la sección 3.2 y se muestra en la Figura 3.4, la mezcla AF65 50% MIBC 50% se presenta como la del mejor resultado pues en concentraciones altas como bajas, logra una excelente reducción de la tensión superficial.

Se observa también que la mezcla rica en AF65 tiene menor CMC, lo cual concuerda con Erdoğan (2005). Este comportamiento puede deberse a que la longitud del grupo hidrofóbico del AF65 es mayor que la del MIBC, haciendo éste último menos soluble en el agua, además de que tiene alta tendencia a adsorberse en la interface y a formar micelas, tal como se corrobora con los menores valores obtenidos de ΔG_{ad}° y de ΔG_{mic}° y los mayores valores obtenidos de ω y K_{ad}

Es importante señalar que los resultados obtenidos para el MIBC están de acuerdo con los estudios de flotación de carbón realizados por Piñeres (2008) y Guerrero (2010) en los cuales se utilizó mayor concentración en comparación con el AF65. También esos autores anotan que el comportamiento del MIBC usando una columna de flotación no fue efectivo en comparación con el AF65. Pareciese que el MIBC requiere alta turbulencia para funcionar, tal como se hace en una celda de flotación.

La Tabla 3.3 muestra los resultados cuando se utiliza NaCl en las soluciones. Tal como se obtuvo en los experimentos sin presencia de NaCl, las soluciones ricas en AF65 presentan las menores CMC y las mayores tensiones superficiales.

Tabla 3.3 Resultados para las mezclas en presencia de NaCl.

Solución	CMC (M)	Υ_{CMC} (Dinas/cm)	$\Delta^{\circ}_{\text{mic}}G$ (J/mol)	K_{ad} (litros/mol)	ω (m ² /mol)	$\Delta^{\circ}_{\text{ad}}G$ (J/mol)
AF65 100%	0.0012	35	-16384.2			
MIBC 100%	0.0513	30	-7235.5	12.54	86.46	-6161.2
AF65 20% MIBC 80%	0.0144	31	-10330.6	1.01E+05	1024.131	-28071.4
AF65 50% MIBC 50%	0.0063	30.5	-12344.5			
AF65 80% MIBC 20%	0.0022	36	-14907.5			

Al comparar los resultados de las Tablas 3.2 y 3.3 se observa que, en general para todas las soluciones, los valores de la CMC son menores en presencia de NaCl en comparación con su ausencia, lo cual está en concordancia con los menores valores $\Delta G^{\circ}_{\text{mic}}$.

Se nota también en la Tabla 3.3 que en presencia del NaCl, las propiedades K_{ad} y ω para el MIBC 100% son menores en comparación con los presentados por la mezcla AF65 20% MIBC 80%. Estos resultados pueden deberse a que la presencia del AF65 en la mezcla incrementa la adsorptividad de las moléculas en la interface gas líquido así como el numero de moléculas.

Guerrero (2010) realizó pruebas preliminares con el fin de encontrar la mejor concentración de cada surfactante para el proceso de flotación de lodos finos de carbón. Para el MIBC realizó pruebas con concentraciones de 20, 30 y 40 ppm, encontrando que la más efectiva fue ésta última. Para el AF65 trabajó con concentraciones de 10, 15 y 20 ppm y la más efectiva en este caso fue también la última.

Debido a que el poder espumante del AF65 es menor que para el MIBC, Guerrero utilizó concentraciones menores para éste, lo cual es reafirmado en este trabajo

investigativo ya que para las concentraciones por debajo de la micelar, el AF65 logra una tensión superficial más baja que el MIBC.

Teniendo en cuenta que 40 ppm de MIBC y 20 ppm de AF65 equivalen a 3.9×10^{-4} M y 5.1×10^{-5} M respectivamente, se concluye que las concentraciones micelares críticas encontradas para estos dos surfactantes sin presencia de NaCl, 0.0779 M para el MIBC y 0.0042 M para el AF65, son cantidades mucho más superiores que las empleadas en la realización de pruebas de flotación del Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón de la Universidad del Valle.

Lo anterior afirma que en las pruebas realizadas por el Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón de la Universidad del Valle no se usa surfactante en exceso pues no se sobrepasa las concentraciones límites. Incluso, se recomienda realizar pruebas y análisis económicos con concentraciones superiores. Sin embargo, estas concentraciones no deben ser cercanas a las críticas puesto que la solución estaría tan saturada de surfactante que en la interface líquido-gas de las burbujas no habría espacio para las partículas hidrofóbicas del carbón, ya que estaría llena de surfactante adsorbido.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Las concentraciones de los espumantes AF65 (5.1×10^{-5} M) y MIBC (3.9×10^{-4} M), empleados en la realización de pruebas de flotación para beneficiar carbones (Guerrero, 2010), no sobrepasan las concentraciones límites en referencia a las CMC encontradas de cada espumante sin NaCl (0.0042 M para el AF65 y 0.0779 M para el MIBC). Esto indica que no se usa surfactante en exceso.
- El poder espumante de los surfactantes trabajados, tanto en mezclas como puros, se ve incrementado en presencia del cloruro de sodio. Esto se debe a que las CMC de las soluciones logran reducirse consiguiendo tensiones superficiales más bajas para concentraciones por debajo de la micelar.
- El poder espumante del AF65 puro es mayor que el del MIBC puro en soluciones con y sin presencia de cloruro de sodio para concentraciones por debajo de la CMC del AF65, debido a que para este rango de concentraciones se logran tensiones superficiales más bajas para el AF65 que para el MIBC.
- La mezcla de surfactantes para la cual la tensión superficial se mantuvo relativamente baja para todas las concentraciones por debajo de la CMC, fue la mezcla AF65 50% MIBC 50%, haciendo de esta configuración la del mejor resultado para las soluciones con y sin cloruro de sodio.
- El cloruro de sodio tuvo un efecto de acercamiento entre las curvas de las mezclas de los surfactantes utilizados en este trabajo investigativo, esto permite

concluir que las CMC de las mezclas en presencia de cloruro de sodio oscilan en un rango más pequeño que el de las CMC de las mezclas sin la sal.

Recomendaciones:

- Con el fin de entender mejor el comportamiento de la tensión superficial con respecto a la concentración del espumante (o de mezclas de ellos) en concentraciones cercanas a las trabajadas por el Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón de la Universidad del Valle, se recomienda hacer un estudio similar al que se realizó en este trabajo investigativo pero usando concentraciones menores a las trabajadas.
- Realizar estudios de flotación para el carbón con las configuraciones de surfactantes aquí estudiadas, para así determinar cuál es la mejor configuración en la práctica y qué concentración de espumante es la adecuada.
- Realizar estudios de flotación para el carbón utilizando una solución salina (que simule la concentración del mar) en lugar de agua, con las configuraciones de surfactantes aquí estudiadas, para así determinar cuál es la mejor en la práctica.
- Realizar un análisis químico de las soluciones salinas a utilizar en futuros estudios.
- Una vez realizados los estudios de los dos anteriores ítems es conveniente hacer un estudio económico-ambiental para evaluar el escalonamiento a nivel industrial.

BIBLIOGRAFÍA

Adamson, A. y Gast, A. (1997). Physical chemistry of surfaces. Sexta edición. New York: Willey-Interscience, 784 p.

Atkins, P. y Jones, L. (2006). Principios de química: Los caminos del descubrimiento. Tercera edición. Buenos Aires: Médica Panamericana S.A., 171 p.

Aulton, M. E. (2004). Farmacia: La ciencia del diseño de las formas farmacéuticas. Segunda edición. Madrid: Elsevier España S.A., 62 p.

Bulatovic, M. S. (2007). Handbook of Flotation Reagents. Vol. 1. Elsevier Science & Technology Books, 43-51 p.

Burbano, S., Burbano, E., y Gracia, C. (2004). Física general. 32a Edición. Editorial Tebar, 290-296 p.

Dudenrov, S.V., Shubov, L.Y. y Glazunov, L.A. (1980). Fundamentos de la teoría y la práctica de empleo de reactivos de flotación. Editorial MIR, 11-19 p.

Erdoğan, D. (2005) Removal of heavy metals from waste waters by ion flotation. Tesis de maestría: Izmir Institute of Technology, 93 p.

Guerrero, J.S. (2010). Cinética de flotación de lodos finos de carbón. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Universidad del Valle.

Guerrero, J.S. (2011). Comunicación Personal.

Harris, G. y Jia, R. (1999). An improved class of flotation frothers.En: Mineral Engineering, No. 58, 9 p.

Levitt, B. P. (1979). Química física práctica de Findlay. Edición en español. Barcelona: Reverté S.A., 121 p.

Ozdemir, O., Taran, E., Hampton, M.A., Karakashev, S.I. y Nguyen, A.V. (2009). Surface chemistry aspects of coal flotation in bore water. En: Minerals Process, No. 92, 7 p.

Piñeres, J. (2008). Fenómenos superficiales y cinéticos en la concentración del grupo maceral vitrinita en fracciones beneficiadas de carbones colombianos obtenidas por flotación burbujeante. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad del Valle.

Rao, S.R. (2004). Surface chemistry of froth flotation. Segunda Edición. Vol. 2. Nueva York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 143-181 p.

Surface Tension and the Gibbs Adsorption Isotherm. http://chemweb.calpoly.edu/jhagen/CMC_Surface_Tens.pdf, consultada el 5 de septiembre de 2011.

Tan, H., Huang, J. y Huang, G. (2010). Rapid determination of surfactant critical micelle concentration in aqueous solutions using fiber-optic refractive index sensing. En: Analytical Biochemistry, No. 41, 4p.

Tan, S. N., Pugh, R.J., Fornasiero, D., Sedev, R. y Ralston, J. (2004). Foaming of polypropylene glycols and glycol/MIBC mixtures. En: Minerals Engineering, No. 18, 10 p.

Wang, L. y Yoon, R. (2007). Effects of surface forces and film elasticity on foam stability. En: Mineral Process, No. 85, 10 p.

Willis, B. A. (1994). Tecnología de procesamiento de minerales. Mexico D.F: editorial Limusa. 568 p.

ANEXO

Tabla A1 Promedio pruebas 100% MIBC sin NaCl

Promedio 100% MIBC sin NaCl			
MicroL	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
25	4.9	1.6	65.5
50	9.8	2.3	60.7
100	19.5	3.0	53.4
200	38.9	3.7	41.0
300	58.3	4.1	35.0
400	77.5	4.4	30.0
600	115.7	4.8	29.2
800	153.5	5.0	29.1
1000	190.9	5.3	29.1
1200	228.0	5.4	28.9

Tabla A2 Promedio pruebas 100% AF65 sin NaCl

Promedio 100% AF65 sin NaCl			
MicroL	mM	ln (mM)	S (dinas/cm)
10	0.6	-0.5	55.5
20	1.2	0.2	52.9
30	1.7	0.6	51.0
40	2.3	0.8	49.8
50	2.9	1.1	49.2
70	4.1	1.4	47.5
90	5.2	1.7	47.5

Tabla A3 Promedio pruebas 20% AF65 80% MIBC, sin NaCl

Promedio AF65 20% MIBC 80% sin NaCl					
MicroL Aero 65	MicroL MIBC	MicroLTot.	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
25	100.0	125.0	21.0	3.0	42.3
75	300.0	375.0	62.5	4.1	35.8
100	400.0	500.0	83.1	4.4	33.6
150	600.0	750.0	123.8	4.8	28.8
175	700.0	875.0	144.0	5.0	27.7
225	900.0	1125.0	184.1	5.2	27.6

Tabla A4 Promedio pruebas 50% AF65 50% MIBC, sin NaCl

Promedio AF65 50% MIBC 50% sin NaCl					
MicroL Aero 65	MicroL MIBC	MicroLTot.	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
50	50.0	100.0	12.7	2.5	36.1
100	100.0	200.0	25.3	3.2	35.5
200	200.0	400.0	50.3	3.9	34.5
300	300.0	600.0	75.1	4.3	33.8
400	400.0	800.0	99.6	4.6	32.9
500	500.0	1000.0	123.9	4.8	29.3
600	600.0	1200.0	147.9	5.0	28.3
700	700.0	1400.0	171.7	5.1	29.2

Tabla A5 Promedio pruebas 80% AF65 20% MIBC, sin NaCl

Promedio AF65 80% MIBC 20% sin NaCl					
MicroL Aero 65	MicroL MIBC	MicroLTot.	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
60	15.0	75.0	6.4	1.9	41.9
90	22.5	112.5	9.6	2.3	40.8
120	30.0	150.0	12.8	2.6	39.5
150	37.5	187.5	16.0	2.8	38.7
180	45.0	225.0	19.2	3.0	37.9
210	52.5	262.5	22.4	3.1	37.9
240	60.0	300.0	25.5	3.2	37.8

Tabla A6 Promedio pruebas 100% MIBC en presencia de NaCl (1M)

Promedio 100% MIBC, NaCl 1M			
MicroL	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
20	3.9	1.4	47.8
40	7.8	2.1	47.6
60	11.7	2.5	46.2
80	15.6	2.7	45.3
100	19.5	3.0	45.0
150	29.2	3.4	42.2
200	38.9	3.7	38.7
250	48.6	3.9	30.5
300	58.3	4.1	30.4

Tabla A7 Promedio pruebas 100% AF65 en presencia de NaCl (1M)

Promedio 100% AF65, NaCl 1M			
MicroL	mM	ln (mM)	S (dinas/cm)
20	1.2	0.2	37.7
30	1.7	0.6	37.7
40	2.3	0.8	36.5
50	2.9	1.1	36.5
60	3.5	1.2	36.1
70	4.1	1.4	36.1
80	4.6	1.5	36.1
100	5.8	1.8	35.8
140	8.1	2.1	35.4

Tabla A8 Promedio pruebas 20% AF65 80% MIBC, en presencia de NaCl (1M)

Promedios AF65 20% MIBC 80%, NaCl 1M					
MicroL Aero 65	MicroL MIBC	MicroLTot.	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
5	20.0	25.0	4.2	1.4	37.2
10	40.0	50.0	8.4	2.1	36.6
15	60.0	75.0	12.6	2.5	35.6
20	80.0	100.0	16.8	2.8	35.5
25	100.0	125.0	21.0	3.0	35.5
37.5	150.0	187.5	31.4	3.4	33.5
50	200.0	250.0	41.8	3.7	33.2
62.5	250.0	312.5	52.2	4.0	31.8
75	300.0	375.0	62.5	4.1	31.4
87.5	350.0	437.5	72.8	4.3	31.3

Tabla A9 Promedio pruebas 50% AF65 50% MIBC, en presencia de NaCl (1M)

Promedios AF65 50% MIBC 50%, NaCl 1M					
MicroL Aero 65	MicroL MIBC	MicroLTot.	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
25	25.0	50.0	6.3	1.8	32.3
50	50.0	100.0	12.7	2.5	32.3
75	75.0	150.0	19.0	2.9	31.5
100	100.0	200.0	25.3	3.2	31.8
125	125.0	250.0	31.5	3.5	32.1
150	150.0	300.0	37.8	3.6	32.2
200	200.0	400.0	50.3	3.9	30.5
250	250.0	500.0	62.7	4.1	30.2
300	300.0	600.0	75.1	4.3	30.5

Tabla A10 Promedio pruebas 80% AF65 20% MIBC, en presencia de NaCl (1M)

Promedios AF65 80% MIBC 20%, NaCl 1M					
MicroL Aero 65	MicroL MIBC	MicroLTot.	mM	ln(mM)	S (dinas/cm)
20	5.0	25.0	2.1	0.8	37.3
40	10.0	50.0	4.3	1.5	35.8
60	15.0	75.0	6.4	1.9	35.9
80	20.0	100.0	8.6	2.1	36.4
100	25.0	125.0	10.7	2.4	35.8
150	37.5	187.5	16.0	2.8	35.9
200	50.0	250.0	21.3	3.1	34.9
250	62.5	312.5	26.6	3.3	35.2
300	75.0	375.0	31.8	3.5	34.7